USAID | COLOMBIA
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Programa BIOREDD+

ENTREGABLE 14: SISTEMA MRV Y CALCULADORA DE CARBONO

Número de Subcontrato: EEP-I-00-06-00013-00-GEM-00
Nombre: GeoEcoMap Inc.

Marzo de 2015

Este documento fue producido para revisión por la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Fue elaborado por GeoEcoMap Inc. para el Proyecto BIOREDD+, número de tarea AID-514-TO-11-00002.

Acerca de este Documento

Este documento se ha desarrollado para el programa BIOREDD+ de USAID para proveer las actividades de monitoreo climático durante el período de acreditación de BIOREDD+. El documento resume las mediciones requeridas para actualizar y revisar los factores de emisiones de línea base, el método de detección remota para monitorear LULC y estimar las emisiones y retiros durante el período de acreditación y antes de cualquier evento de verificación.

Tabla de Contenido

LISTADO DE SIGLAS 4
RESUMEN EJECUTIVO 5
1 INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO 5
2 MÉTODOS DE MEDICIÓN 6
2.1 LiDAR 6
2.1.1 Vuelos LiDAR 8
2.1.2 Procesamiento de LiDAR 9
2.1.3 Modelos LiDAR 11
2.2 Estimados LiDAR de Inventarios de Carbono 11
2.2.1 Actualización de los Inventarios de Carbono de Bosques Primarios 11
2.2.2 Actualización de Inventarios de Carbono de Bosques Degradados 12
2.2.3 Actualización de Otras Reservas de Carbono 13
2.3 Factores de Emisiones para verificación 13
2.3.1 Actualización de Factores de Emisiones para Bosques Primarios 13
2.3.2 Actualización de Factores de Emisiones para Bosques Degradados 13
2.3.3 Tabla de Factores de Emisiones para Áreas de Proyecto 14
3 MÉTODOS DE MONITOREO 15
3.1 Monitoreo del Cambio en el Uso de la Tierra 15
3.1.1 Fuentes de Datos 16
3.1.2 Procesamiento de Datos 16
3.1.3 Clasificación LULC 18
3.1.4 Análisis de Cambio de LULC 19
4 ORGANIZACIÓN 19
4.1 Roles y Responsabilidades 19
4.2 Estructura Organizacional 20
4.2.1 El sistema MRV-arquitectura de gestión 20

Lista de Siglas

AFOLU	Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra
AGB	Biomasa en Superficie
ALOS	Satélite Avanzado de Observación Terrestre
BGB	Biomasa Bajo Tierra
BMyF	Bajo Mira y Frontera
CCBA	Comunidades de Carbono y Alianza para la Biodiversidad
CELI	Consolidación y Mejoramiento de Subsistencia
CONIF	Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal,
CSR	Responsabilidad Social Corporativa
DCA	Autoridad de Créditos para el Desarrollo
DEM	Modelo de Elevación Digital
ESPA	Acuerdo de Compra de Servicios Ambientales
FAAN	Fondo para la Acción Ambiental y la Niñez
FPIC	Consentimiento Previo Informado y Libre
GOC	Gobierno Colombiano
HRP	Programa de Derechos Humanos
IDEAM	Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales
INCODER	Instituto Colombiano de Desarrollo Rural
IRR	Tasa Interna de Retorno
LIDAR	Detección y Rango de Imágenes Laser
LOI	Carta de Intención
MIDAS	Más Inversión para el Desarrollo Sostenible
MODIS	Imágenes con Espectroradiómetro de Resolución Moderada
MRV	Monitoreo Registro y Verificación
NASA	Agencia Nacional Aeroespacial
NPC	Compañía de Producción Naidi
NPV	Valor Presente Neto
PALSAR	Radar de Apertura Sintética de Banda-L y de Matriz en Fase
PD	Documento del Proyecto
PES	Pago por Servicios Ambientales
REDD	Reducciones en Emisiones por Deforestación y Degradación Evitadas
SAR	Radar de Apertura Sintética
SMEs	Empresas Pequeñas y Medianas
SPV	Vehículo de Propósito Especial
TA	Asistencia Técnica
TBD	A definirse
tCO2e	Tonelada de dióxido de carbono equivalente
TGC	Terra Global Capital
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
US$	Dólar de Estados Unidos
VCS:	Estándar de Carbono Verificado
VCU:	Unidad de Carbono Verificada

Resumen Ejecutivo

Este documento resume los procedimientos operativos estándar para medir y monitorear los inventarios de carbono y sus cambios para cuantificar los beneficios climáticos para los proyectos BioREDD de USAID en la Costa Pacífica Colombiana. Aquí esbozamos la metodología de las mediciones para actualizar las emisiones de carbono antes de la primera verificación y proveemos los métodos de monitoreo, las fuentes de datos, y la organización para todo el período de acreditación. El proyecto monitoreará todos los componentes requeridos según la metodología VM0006. En general, todos los componentes para calcular los beneficios reales de GHG generados por el proyecto REDD+, o las Reducciones Netas en Emisiones antropogénicas (NER) se incluyen en el plan de monitoreo:

1. Monitoreo de motores de deforestación, actividades de proyecto y fuentes de emisiones relacionadas con las actividades del proyecto REDD+ dentro y fuera del Área del Proyecto.
2. Monitoreo de motores de degradación, actividades de proyecto y fuentes de emisiones relacionadas con las actividades del proyecto REDD+ dentro y fuera del Área del Proyecto.
3. Monitoreo de transiciones entre clases LULC en el Área del Proyecto, el Área de Fugas y la Región de Referencia

Se produce un reporte de monitoreo que contiene toda la información anterior y esboza los cálculos para los NER reales generados. Las herramientas del sistema MRV de BioREDD enfocarán las mediciones para actualizar los factores de emisiones para bosques degradados y primarios capturando nuevos datos LiDAR sobre estas áreas. El plan de monitoreo rastreará cambios de bosque a no-bosque, no-bosque a bosque, degradación forestal y recuperación forestal de manera sistemática monitoreando las transiciones de LULC. El método también mostrará como integrar datos de detección remota específicas para la región (es decir, Landsat, ALOS-PALSAR, LiDAR, etc.) a herramientas de monitoreo en conjunto con vuelos LiDAR repetidos para actualizar los factores de emisiones de línea base para calcular el cambio de carbono anual con el error estadístico requerido (10% con un intervalo de confianza del 95%) sobre las áreas de proyecto, referencia y fugas. Todas las herramientas, técnicas de medición y cálculos se han desarrollado según los requerimientos del VM0006 y VCS AFOLU.

El proyecto BioREDD usará la metodología VM0006 del Estándar de Carbono Verificado para cuantificar los inventarios de carbono y las reducciones en emisiones netas, además de un análisis integral de las imágenes satelitales realizado por GeoEcoMap.

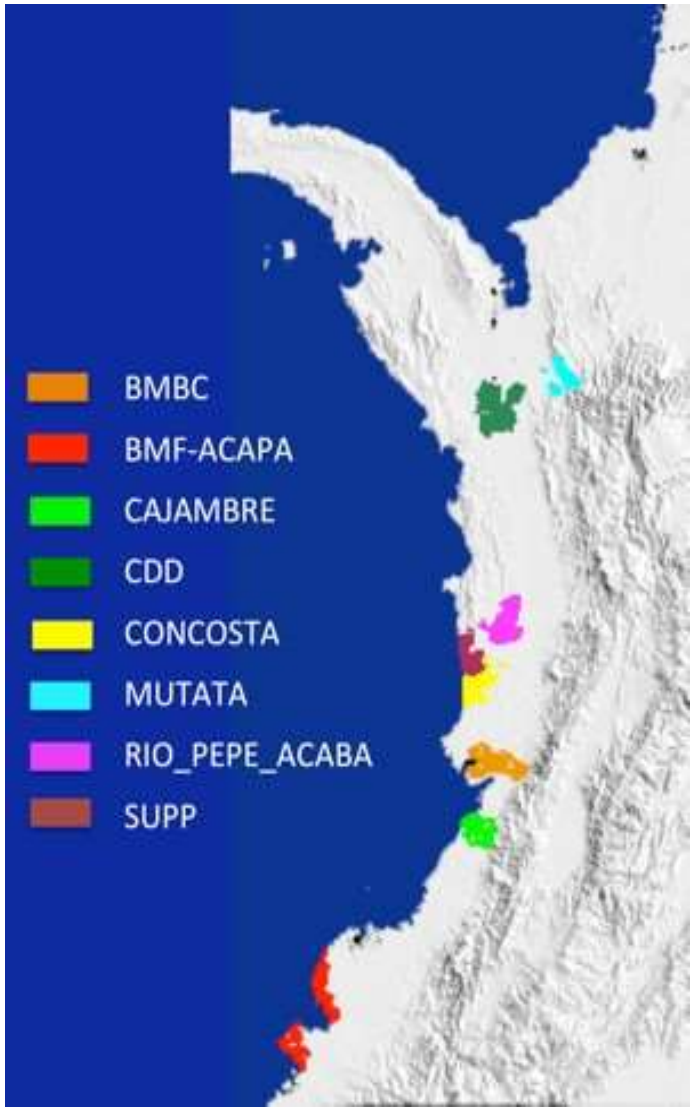

Figura 1. Ubicación de 8 áreas de proyecto BioREDD en la Costa Pacífica Colombiana

1 Introducción y Contexto.

El proyecto BioREDD nació en 2012 como el programa ambiental bandera de la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional USAID) en Colombia. El programa de US$27.9 millones se ha diseñado para fortalecer la capacidad colombiana de mitigar y adaptarse al cambio climático, proteger la biodiversidad y apoyar el desarrollo de comunidades remotas y empobrecidas. El desarrollo de los proyectos REDD+ es un elemento clave del Programa, que busca promover medios de vida sostenibles y compatibles con la conservación del bosque. BIOREDD+ está desarrollando un portafolio de 8 proyectos REDD+ en el Pacífico colombiano que serán validados bajo la Alianza del Clima, la Comunidad y la Biodiversidad (CCBA) y el Estándar de Carbono Verificado (VCS). Los proyectos están ubicados en cuatro nodos geográficos que cubren más de 700,000 hectáreas.

Número de Proyectos de BioREDD

El proyecto BioREDD seleccionó ocho áreas a lo largo de la región de la Costa Pacífica colombiana para desarrollar los proyectos REDD+ (Figura 1). Estas áreas se distribuyen en diferentes municipios a lo largo de los bosques de la costa pacífica colombiana, cubriendo una amplia variedad de ecosistemas, haciendo transición de manglares costeros y humedales a páramos y bosques de alta montaña. Esta área hace parte del corredor biogeográfico del Chocó uno de los 10 puntos calientes megadiversos del mundo que da cuenta de más del 40% de la población vertebrada total de Colombia. Los proyectos REDD+ se establecerán en los territorios de comunidades afrocolombianas e indígenas en la costa donde los bosques han sido degradados y se encuentran bajo la amenaza de una mayor degradación y deforestación por múltiples razones. Los principales motores de los cambios en la cubierta forestal se han identificado como extracción de madera para necesidades de combustible y desarrollo, talas ilegales, minería de oro, y conversión de estos bosques a agricultura y ganado. Los proyectos se están desarrollando conjuntamente con las comunidades locales que posean un título legal claro sobre sus tierras y hayan estado de acuerdo ellas mismas con el desarrollo del proyecto REDD+. Estarán implementando actividades de los proyectos REDD+ con la expectativa de generar ingresos como compensación por sus esfuerzos de conservación.

2 Métodos de Medición

El plan de monitoreo incluirá la captación de datos aéreos LiDAR antes del primer evento de verificación para actualizar los factores de emisiones para bosques degradados y primarios. Estas son las únicas mediciones que actualizarán los factores de emisiones de línea base antes de la primera verificación para reducir los descuentos por incertidumbre requeridos por VM0006. Siguiendo los requerimientos de VM0006 (9.3.2 y 9.3.9), los factores de emisiones se actualizarán antes de cada actualización de la línea base cada 10 años. Todos los cálculos de emisiones y retiros durante el período de acreditación se basarán en el monitoreo de transiciones LULC y el uso de los factores de emisiones fijados entre dos actualizaciones de línea base a excepción de los bosques intactos que podrían haber sufrido una degradación selectiva y a baja escala y que no sea detectada usando técnicas de monitoreo LULC por detección remota. En este caso se aplicarán medidas conservadoras adicionales al actualizar los factores de emisiones para bosques intactos o primarios antes de los siguientes vuelos LiDAR. Un resumen de los métodos de medición y los procedimientos operativos estándar para las mediciones LiDAR para actualizaciones de línea base aparece abajo y se describen extensamente en las referencias aquí citadas.

2.1 LiDAR

El plan de adquisición de datos por LiDAR se basa en el requerimiento de revisar los factores de emisiones estimados para todos los bosques durante el período de acreditación para las 8 áreas de proyecto y referencia en la región de la Costa Pacífica colombiana. El plan de MRV actual cubre todas las áreas del proyecto y se enfoca en bosques tanto intactos (sin perturbación en la línea base) como degradados según se indica en el mapa LULC de línea base. El plan incluye el área mínima requerida para permitir un estimado no sesgado de la biomasa forestal de las áreas intactas y degradadas y evita cualquier exuberancia en la adquisición de datos y los costos de procesamiento para el proyecto durante el período de acreditación. El abordaje utilizado al inicio del proyecto para desarrollar los factores de emisiones de línea base se aplica para la adquisición de datos LiDAR y se esboza en la nueva herramienta VCS VT0005 desarrollada conjuntamente por Terra Global Capital y EcoGeoMap (VT0005: Herramienta para Medir la Biomasa Forestal Viva en Superficie Usando la Detección Remota). Este método incluye los siguientes pasos:

1. Usar el LULC de VM0006 más reciente para delinear bosques intactos y degradados en todas las áreas de proyecto.
2. El plan recomienda un área mínima total de aproximadamente 16.000 Ha para las 8 áreas de proyecto permitiendo vuelos de referencia de 8.000 Ha que cubran áreas previamente voladas para detectar cualquier cambio y/o examinar la precisión de los estimados anteriores y un mínimo de 8,000 Ha de datos LiDAR nuevos para un mínimo de 1,000 Ha por área de proyecto para ajustar y actualizar los factores de emisiones para bosques degradados. El área cubierta por cada proyecto será de aproximadamente 2000 Ha para cada actualización de línea base. Cualquier dato adicional sobre las áreas de proyecto mejorará la precisión de los estimados de los factores de emisiones pero no se considerará necesario.
3. Se captarán datos LiDAR una vez antes de la primera verificación para actualizar los factores de emisiones para bosques tanto degradados como intactos y para documentar cambios en términos de mayor degradación o regeneración. Se repetirán los vuelos LiDAR cada 10 años para actualizar la línea base.
4. Los factores de emisiones se calcularán usando el mismo algoritmo de estimación de biomasa por LiDAR usado para estimar el factor de línea base (véase VT0005) siempre y cuando la precisión general y la densidad de puntos de los vuelos LiDAR sean aproximadamente iguales. Las especificaciones para los datos LiDAR se proveen en VT0005 y se repiten en este documento en la Tabla I. La alometría de biomasa LiDAR permanece estable en cada región y no cambiará significativamente al usar mediciones repetidas para monitoreo.

5. En cada área de proyecto, el proyecto seleccionará un transecto de muestra LiDAR existente (mínimo 1000 Ha) como el área de referencia que volarán los vuelos LiDAR antes de la primera verificación y cada 10 años de ahí en adelante.
6. Se seleccionará aleatoriamente otro punto en bosques degradados e intactos en cada área de proyecto para desarrollar una sola línea de vuelo dirigida aleatoriamente que cubra aproximadamente 1000 Ha y que no se traslape con la línea de referencia. El transecto de muestreo aleatorio se refiere a una nueva muestra levantada y se realizará usando el método de la Trama Recursiva de Cuadrante Aleatorio Inverso (RRQRR), una técnica basada en SIG para generar una lista de varios miles de muestras dentro de un marco de diseño basado en probabilidades y seleccionar una realización como la muestra sugerida para todas las áreas del proyecto. Recomendamos adquirir las muestras nuevas como transectos largo (0.5 km x 20 km) tanto como mecanismo de ahorro y para poder cubrir un área grande. El transecto largo será preferible para cubrir áreas tanto intactas como degradadas en cada sitio de proyecto. Esto permitirá que el proyecto extienda los vuelos LiDAR a más de 20 km en el caso que los fondos de monitoreo permitan la cobertura de un área mayor. La selección aleatoria de nuevos vuelos permitirá un estimado no sesgado de cambios para actualizar los factores de emisiones y evitar cualquier cambio que podría evitarse intencionalmente en áreas definidas para el monitoreo. La selección de puntos aleatorios para vuelos LiDAR puede realizarse antes de los vuelos para evitar cualquier conocimiento a priori de las líneas de vuelo. Se proveen ejemplos de los vuelos LiDAR para tres áreas de proyecto en la Figura 2.
7. Los requerimientos para la adquisición de datos LiDAR en cuanto a números de puntos, precisión de calibración y pasos de proceso seguirán el mismo diseño anterior (véase el Informe GeoEcoMap # 2) y según los recomendado por VT0005.
8. En conjunto con los datos LiDAR, la adquisición aérea incluirá datos de imágenes digitales de alta definición para una verificación visual de las áreas degradadas y separar las masas forestales potencialmente intactas de áreas degradadas dentro de la huella LiDAR.

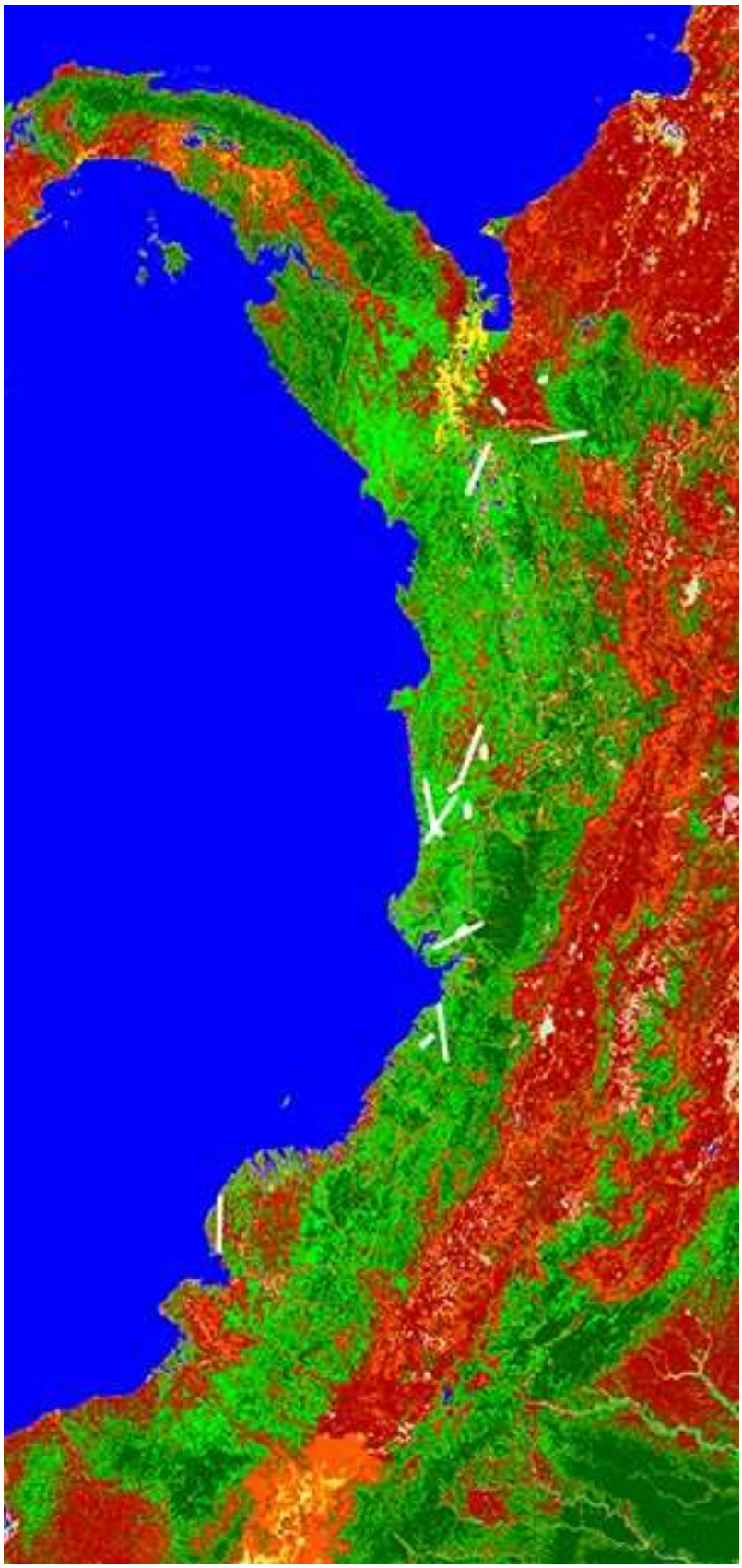

Fig. 2. Distribución de más de 16000 Ha de líneas de vuelo LiDAR diseñadas para actualizar factores de emisiones para bosques degradados antes del primer evento de verificación en 2016.

9. Todos los datos LiDAR deben adquirirse con la ganancia máxima para tener los mejores retornos del suelo bajo cobertura forestal densa y los proveedores deberá entregar información acerca de la ganancia durante todas las adquisiciones de datos. Si el proveedor LiDAR es distinto al proveedor que adquirió la línea base, deben seguirse los requerimientos definidos en el Informe GeoEcoMap Report # 2 que permitirán una calidad de datos comparable para estimación de la biomasa.

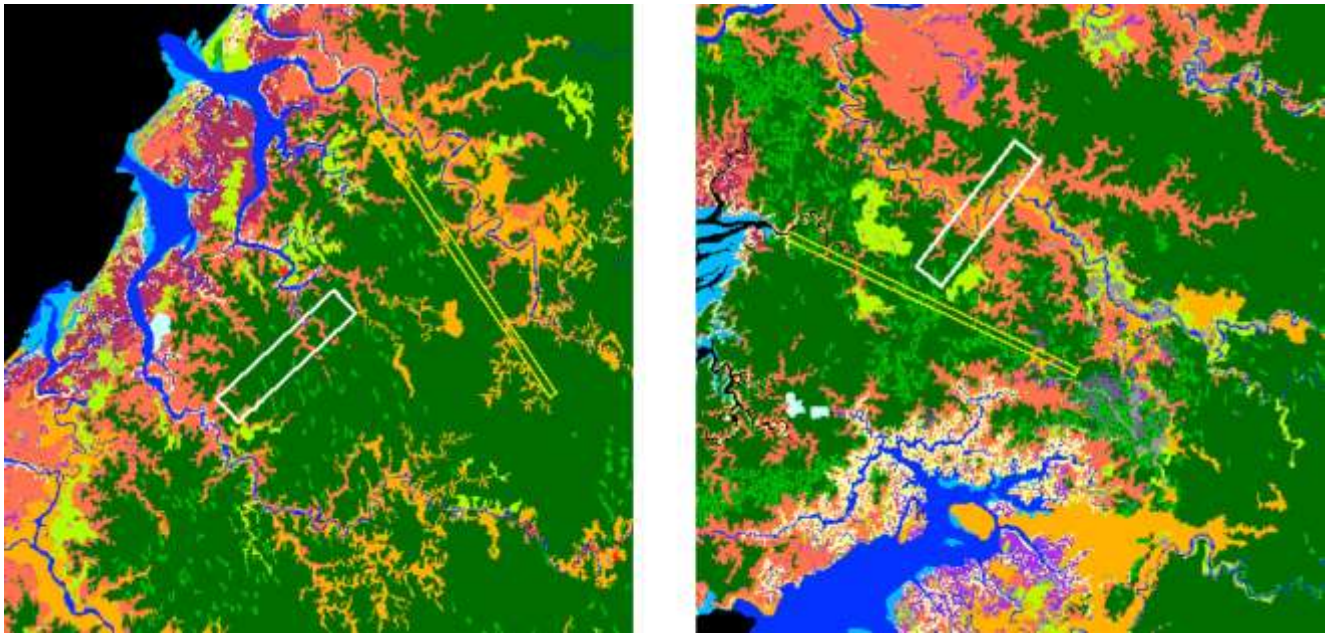

Fig. 2. Muestras de vuelos LiDAR para cada área de proyecto mostrando una de las líneas de vuelo LiDAR originales (1000 Ha) en blanco y una nueva línea de vuelo en Amarillo (1000 Ha). La nueva línea de vuelo se selecciona aleatoriamente en el área del proyecto y en los tipos de clase forestal (intacto y degradado) para actualizar los factores de emisiones y capturar cualquier cambio en la cobertura forestal y el contenido de carbono debido a deforestación y degradación a pequeña o gran escala.

2.1.1 Vuelo LiDAR

Recomendamos las siguientes líneas de vuelo LiDAR como áreas potenciales que se cubrirán para revisar y actualizar los factores de emisiones para bosques degradados e intactos. Las líneas de vuelo sugeridas incluirán 16000 Ha en total sobre 8 áreas de proyecto de BioREDD (Fig. 2.). Todos los vuelos se diseñarán según las siguientes especificaciones.

Especificaciones Generales para LiDAR		
Descripción		**Especificaciones**
1	Requerimientos de Precisión Vertical Fundamental (FVA, en inglés)	La Precisión Vertical Fundamental (FVA) de los datos de la nube de puntos LiDAR se evaluará y reportará usando las pautas de US NDEP/ASPRS: El Requerimiento de Precisión Vertical Fundamental (FVA) para la Colección LiDAR es: **PrecisionZ <= +/- 25 cm, a intervalo de confianza del 95% (1.96 x RMSEz)** La precisión en Z se compara con la de la GCP a la misma altura elipsoidal
2	Requerimientos de Precisión Horizontal Fundamental	El Requerimiento de Precisión Horizontal Fundamental (FHA) para la adquisición y la carga LiDAR: **Precisión X,Y <= +/- 30 cm, @ a intervalo de confianza del 95% (1.96 x RMSExy)** La precisión en X,Y se compara con la de la GCP.

3	Requerimientos del Sensor	El sensor LiDAR deberá: 1. Haber sido calibrado en fábrica en los 12 meses anteriores a la adquisición (se requerirá presentar el certificado de calibración). 2. Detectar múltiples retornos discretos con un mínimo de 4 retornos para cada pulso laser saliente. 3. Discriminación Vertical Absoluta <= **4m** 4. Registrar la intensidad de cada retorno en >= resolución radiométrica a 8-bits 5. Frecuencia Máx de Escaneo >= 70Hz 6. Frecuencia Más de Pulso >= 45kHz
4	Requerimientos de Adquisición	1. El diseño del levantamiento deberá incluir: a. Un solo tramo, de primer retorno con Espaciado Pos Nominal (NPS) de 1.0 metros y no más grueso de 2.0 metros b. Ángulo de escaneo no podrá exceder los 40° FOV total (+/-20° desde el nadir) 2. El traslapo de las líneas de vuelo debe ser **>40%.**
5	Entregables del Vuelo LiDAR	1. Plan de Vuelo: 2. Datos y Gráficas Según se Volaron (trayectorias, velocidad, altura, posición, FOV, traslapo de tramos, cobertura de adquisición) 3. Datos GPS-IMU 4. Imágenes de fotogramas R-G-B primarios 5. Base de Datos del Vuelo 6. Informe de Calibración de Instrumentos 7. Calibración de Instrumento/GPS/IMU 8. Bitácoras de Vuelo

2.1.2 Procesamiento LiDAR

El proyecto recomienda los siguientes requerimientos para la adquisición y el procesamiento de datos para permitir una calidad de datos similar a lo adquirido durante las campañas de vuelo de línea base.

Pasos de Procesamiento LiDAR: Especificaciones de la Nube de Puntos		
Entregables		**Especificaciones**
1	Nube de Puntos No Clasificado (Elipsoidal)	1. Todos los retornos, todos los puntos adquiridos, completamente calibrados y ajustados a datos verticales específicos, por tramo. 1 archivo por tramo. 2. Cumple LAS v1.2 plenamente, formato de registro de puntos con todos los atributos estándar incluyendo: a. Valores de intensidades (resolución radiométrica nativa). b. Número de Retorno. c. Número de Retornos. d. Información de georeferenciación en todos los encabezados de los archivos LAS. e. Tiempos GPS registrados como tiempo GPS ajustado, a una precisión suficiente para permitir marcas de tiempo (*timestamps)* únicos para cada pulso. 3. Entregables LASv1.2 4. Los nombres de los archivos deben discutirse y decidirse después.
Especificaciones de las Imágenes RGB		
Entregables		**Especificaciones**
1	Cámara Digital	Plano Focal - CCD de transferencia de fotograma completo a 39 MP - 7162 x 5389 pixeles (38,596,018 pixeles activos) - Tamaño de pixel de 6.8 um

		- Filtro de matrices Bayer - Frecuencia máx de fotogramas 0.5 Hz (2.02 segs por fotograma) - Rango dinámico de 12 bits - Movimiento máximo en el eje de puntería después de retirar y reemplazar la cabeza de la cámara = 0.5 pixel Control de Exposición via - Ganancia 1, 2, 3, 4 - Tiempo de exposición >1/4000 seg - Modos automático y manual - Sin ajuste de apertura (fijo en f-4.0)
2	Entregables Levantamiento Fotogramétrico	1. Plan de Vuelo: 2. Gráficas y Datos Según se Volaron 3. Datos GPS-IMU 4. Imágenes de fotogramas primarios en R-G-B 5. Base de Datos del Vuelo 6. Reporte de Calibración de Cámara 7. Calibración de Cámara/GPS/IMU 8. Bitácoras de Vuelo

El equipo de monitoreo deberá realizar algunos pasos de pos-procesamiento para que los datos LiDAR estén listos para desarrollar estimados de biomasa. Estos incluyen:

1. Crear un mapa de elevación forestal a la resolución nativa de LiDAR (p.ej. 1-m) creando un CHM (modelo de altura de la cubierta) a partir de la diferencia entre el DSM (Modelo de Superficie Digital: el primer retorno) y CHM (Modelo de Terreno Digital: Último Retorno).
2. Usar el CHM que representa la altura de la cubierta superior a una resolución nativa LiDAR a 1-m para desarrollar la altura superior media promedio de la cubierta MCH a 50 m (0.25-Ha) o 100 m (1-Ha) para aplicar los modelos de biomasa LiDAR desarrollados para la misma relación a partir de relacionar la métrica LiDAR y los datos de suelos en la región.
3. Desarrollar un mapa de biomasa forestal por tramos a una resolución de 0.25-ha o 1-ha.
4. En el caso de bosques intactos y degradados combinados en la cobertura LiDAR, separar los dos delineando áreas de bosques degradados usando una combinación del estimado de la cubierta forestal por LiDAR y una interpretación visual de las imágenes digitales aéreas a color.
5. Examinar los cambios en la cubierta forestal y la Biomasa en los datos LiDAR de referencia y estimar las áreas degradadas en la muestra del transecto LiDAR del nuevo levantamiento.
6. Se analizan tanto las áreas degradadas por cambios en la cubierta forestal y la biomasa para proveer estimados del porcentaje de área degradada o recuperada de degradaciones anteriores, y los nuevos factores de emisiones.

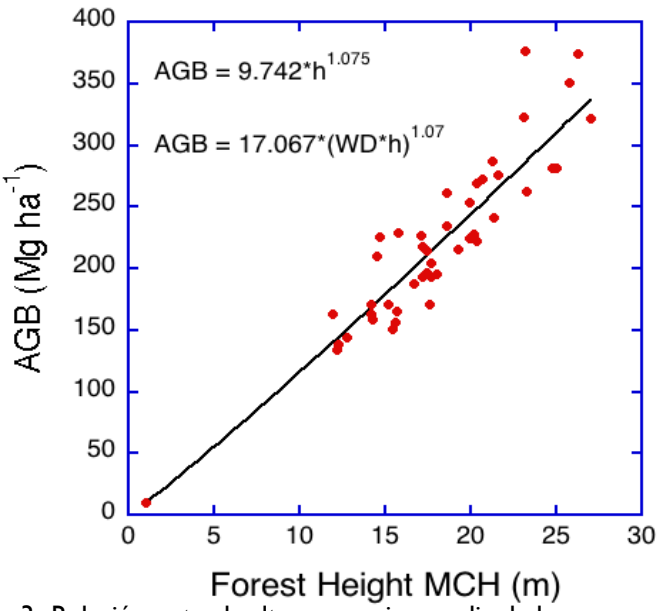

Fig. 3. Relación entre la altura superior media de la cubierta por LiDAR y la biomasa forestal en superficie derivada de mediciones LiDAR y 45 lotes en tierra sistemáticamente diseñados en un escenario forestal degradado usado para estimar la línea base de los factores de emisiones.

7. Los levantamientos LiDAR de alta resolución en sitios de referencia y nuevos levantamientos permitirán cuantificar las degradaciones menores en clases forestales intactas y la degradación continua en áreas degradadas detectando retiros de árboles individuales o pequeños cambios de infraestructura. La degradación a pequeña escala podría cambiar o no de manera significativa los factores de emisiones para las clases de bosque y bosque degradado pero se incluirá igualmente en los cambios LULC.

Las pautas de AC/CC propuestas como parte del plan de monitoreo en la sección PD 8.1.3.1 verifican la precisión y consistencia de las observaciones LiDAR y la integridad de la adquisición de datos, la gestión de bases de datos del proyecto y el archivo de la base de datos durante el período de acreditación.

2.1.3 Modelos LiDAR

El proyecto utilizará el mismo modelo de biomasa LiDAR desarrollado durante el análisis LiDAR de la línea base para estimar la biomasa de todos los tipos de bosque y revisar los factores de emisiones de la línea base. Este modelo se desarrollo usando los datos LiDAR y los lotes en tierra según se discutió los informes de GeoEcoMap #8 y 9 y el reporte de incertidumbre # 16. El modelo tiene la siguiente forma general:

$$AGB = a(WD \times h)^b + \epsilon$$

donde WD representa el valor medio de la densidad de madera por lote en unidades de g cm^{-3}, h representa la altura media de la cubierta superior MCH en unidades de m, y $\epsilon \sim N(0,\sigma^2)$ representa la incertidumbre en las mediciones o cuando las observaciones se desvían de una ley de potencia tomando en cuenta la heteroscedasticidad. El modelo usado en los estimados de la línea base aparece aquí como referencia. Este modelo se deriva de los 45 lotes de muestra a 0.25 Ha con los errores de geolocalización corregidos.

2.2 ESTIMADOS LIDAR DE LOS INVENTARIOS DE CARBONO

Se usarán vuelos LiDAR para estimar los inventarios de carbono en superficie en bosques primarios y degradados. Los inventarios de carbono para las demás clases no forestales según la metodología VM0006 como los humedales no forestales, agricultura, pastizales, asentamientos y otros, permanecerán fijos y no cambiarán durante el período de acreditación para todos los proyectos BioREDD. Los inventarios de carbono en una reserva de suelos orgánicos no se incluirán en la contabilidad de carbono y no se monitorearán durante a lo largo del período de acreditación.

2.2.1 Actualización de los Inventarios de Carbono de los Bosques Primarios

Para los bosques intactos o primarios, las nuevas reseñas de datos LiDAR en conjunto con el modelo de biomasa LiDAR que aparece arriba se utilizará para actualizar los inventarios de carbono de los bosques primarios indicados en los reportes GeoEcoMap 8 y 9 durante la primera verificación en el 2016 y las actualizaciones de línea base subsiguientes. Las nuevas imágenes LiDAR se utilizarán para cuantificar los porcentajes de la cubierta forestal a escalas de 0.25 Ha o 1-Ha usando la definición de bosques de árboles > a 5m de altura por cada pixel LiDAR de 1 m. Los inventarios de carbono para LiDAR para todos los pixeles que tengan una cubierta de más del 70% se utilizarán para estimar la media y la varianza de los inventarios de carbono para los vuelos LiDAR usando el modelo estadístico en el reporte GeoEcoMap # 8 y 9 (sección 8) y según la herramienta metodológica de detección remota VT0005. Los nuevos inventarios de carbono para cada área de proyecto se utilizarán para actualizar los factores de emisión de carbono para bosques primarios.

Para los eventos de verificación y monitoreo que ocurran entre actualizaciones de los inventarios de carbono usando mediciones LiDAR (es decir, en la primera verificación y las actualizaciones de la línea base), la contabilidad de los cambios en el inventario de carbono forestal primario se hará utilizando un modelo que subestima de manera conservadora los inventarios de carbono en los bosques primarios. Luego, en las actualizaciones de la línea base, los inventarios de carbono en bosques primarios se actualizarán precisamente usando nuevas mediciones por LiDAR.

Para los eventos de monitoreo que no utilicen vuelos LiDAR programados, los cambios en los inventarios de carbono se medirán únicamente usando técnicas de detección remota. En general los métodos de detección remota podrían no ser capaces de detectar talas selectivas e ilegales donde las comunidades locales extraen una cantidad pequeña de árboles. Para coherencia con los documentos del proyecto y la medición de la línea base, utilizaremos la degradación definida y detectada en los métodos de la línea base donde un cierre de cubierta de entre 30-70% definirá a los bosques degradados y uno de entre 70-100% definirá los bosques primarios. Dado que los agentes de degradación observados en el área del proyecto incluyen talas selectivas que dan como resultado pequeños cambios en la cubierta forestal, se vuelve importante contabilizar la degradación que no da como resultado una transición de bosque primario a bosque degradado según el umbral del 70% pero que sea una degradación con un impacto significativo sobre los inventarios de carbono promedio del bosque primario. Por este motivo, se utiliza un modelo conservador para los inventarios de carbono primario con el fin de contabilizar estos cambios indetectables pero potencialmente significativos en los inventarios de carbono forestal antes de la nueva medición LiDAR y la actualización precisa de los inventarios de carbono forestal reales (Pearson et al. 2014).

Para actualizar de manera conservadora los inventarios de carbono en el bosque primario $C^*_{PF}\left(\frac{tC}{ha}\right)$ entre nuevas mediciones LiDAR, se aplicará el siguiente modelo:

$$C^*_{PF} = C_{PF} \times [1 - f_{DG}(\sum A_{PF-DF})]$$

donde $f_{DG} \in [0,1]$ es la pérdida de carbono fraccional, una función de la suma de todas las transiciones LULC anteriores de bosque primario a bosque degradado $\sum A_{PF-DF}$ desde la fecha de inicio de acreditación del proyecto.

Al actualizar conservadoramente los inventarios de carbono en el bosque primario usando el anterior modelo, el inventario de carbono actualizado es aplicado para actualizar los factores de emisiones asociados con las transiciones del bosque primario a otras cubiertas vegetales utilizadas para monitoreo y verificación (sección 3.1). Estos factores de emisiones actualizados se incrementan con el tiempo como función de f_{DG} y son aplicados de manera conservadora a los cambios LULC en el escenario para determinar las emisiones del projecto en el bosque primario, una sobreestimación.

La pérdida de carbono fraccional se asume proporcional a

$$f = \frac{\sum A_{PF-DF}}{A_{PF}} \times y$$

donde y es la proporción de carbono perdida de la cubierta forestal al reducirse de 100% a 70% (es decir, de bosque primario al límite superior del bosque degradado). Es importante notar que la suma $\sum A_{PF-DF}$ se usa a lo ancho de los períodos de monitoreo para actualizar continuamente el inventario de carbono en el bosque primario.

La base para este modelo predictivo es la suposición de que los agentes de degradación tratarán por igual las áreas del bosque primario (es decir, áreas con un cierre de cubierta de 70-100%) al hacer talas selectivas. Dada esta suposición, la proporción de bosque primario que hace la transición a bosque degradado ($\sum A_{PF-DF} / A_{PF}$), detectable usando técnicas de detección remota, puede considerarse igualmente como la proporción del bosque primario impactado por degradación que no produjo cambio detectable alguno por encima del umbral de 70%. En otras palabras, asumimos que hay una transición de área total de $\sum A_{PF-DF}$ de bosque primario a bosque degradado y asumimos que un área igual $\sum A_{PF-DF}$ está haciendo transición dentro del bosque primario pero que todavía no ha alcanzado la clase de bosque degradado (cubierta del 70%).

Además asumir conservadoramente que $y = \frac{C_{PF} - C_{DF}}{C_{PF}}$ tal que

$$C^*_{PF} = C_{PF} \times \left[1 - \frac{(C_{PF} - C_{DF}) \times \sum A_{PF-DF}}{A_{PF} \times C_{PF}}\right]$$

2.2.2 Actualización de los Inventarios de Carbono de Bosques Degradados

Los nuevos inventarios de carbono para cada área de proyecto se utilizarán para actualizar los factores de emisión de carbono para los bosques degradados. El proyecto realizará un análisis de datos LiDAR sobre el bosque degradado en todas las áreas del proyecto para revisar los inventarios de carbono determinados durante la validación. Los datos LiDAR, en conjunto con el modelo de biomasa LiDAR según aparece arriba, se utilizarán para actualizar los inventarios de carbono de bosques degradados según lo indicado en los informes GeoEcoMap # 8&9. Las nuevas imágenes LiDAR se utilizarán para cuantificar el porcentaje de cubierta forestal a escalas de 0.25 Ha o 1-Ha usando la definición de bosques de árboles 5 m de altura para cada pixel LiDAR de 1 m. Los inventarios de carbono para LiDAR para todos los pixeles que tengan una cubierta que esté entre el 30% y el 70% se utilizarán para estimar la media y la varianza de los inventarios de carbono para los vuelos LiDAR usando el modelo estadístico en los informes de GeoEcoMap # 8 y 9 (sección 8) y según la herramienta metodológica de detección remota VT0005. La comparación de los nuevos estimados en áreas antiguas y áreas nuevas con estimados anteriores en áreas LiDAR antiguas nos permitirá examinar si los factores de emisiones han cambiado y si los cambios se deben al proceso de estimación o a los cambios en la cubierta forestal entendidos como la degradación o regeneración de los bosques degradados. Los estimados de línea base de los factores de emisiones para bosques degradados se revisarán para el proyecto con nuevos valores después de contabilizar los cambios potenciales por cambios forestales. El nuevo estimado del factor de emisiones se revisará y

actualizará cada 10 años según los requerimientos mínimos del VCS. Este proceso se repetirá simultáneamente para todas las áreas del proyecto dentro de la región de BioREDD para permitir reducciones de costos. Para la actualización de las demás reservas de carbono, véase la sección 2.3 o siga el método indicado en el reporte GeoEcoMap #12.

2.2.3 Actualización de otras Reservas de Carbono

Después de actualizar los inventarios de carbono en la biomasa vegetal viva en superficie en lo referente a la materia orgánica de árboles en superficie AGT, para bosques primarios y degradados, todas las demás reservas de carbono pueden actualizarse automáticamente usando los modelos y los factores usados para bosques en la región y descritos en el reporte GeoEcoMap # 12. Estas reservas incluyen: 1. Material orgánica no-forestal en superficie AGNT. 2 Materia orgánica subterránea BG. 3. Materia orgánica por madera muerta en piso LDW. 4. Materia orgánica por madera muerta de pie SDW. 5. Materia orgánica por tocones de árbol muerto DTS.

2.3 FACTORES DE EMISIONES PARA VERIFICACIÓN

Los factores de emisiones de línea base según lo descrito en la Descripción del Proyecto son válidos hasta el primer evento de verificación cuando se revisarán los valores de la línea base usando inventarios de carbono actualizados de los vuelos LiDAR. Para eventos de monitoreo y verificaciones que ocurran sin vuelos LiDAR el modelo conservador presentado en la sección 2.2 se utilizará para actualizar los factores de emisiones que resulten de las transiciones forestales en lugar de los datos LiDAR. Además, los factores de emisiones de línea base se revisarán cada 10 años a partir de la fecha de arranque del proyecto según los requerimientos mínimos del VCS y usando datos LiDAR. Las revisiones de línea base de factores LULC y de emisiones aplicarán a los límites temporales de las áreas de proyecto, referencia y fugas.

Los procesos de adquisición de datos con respecto a la revisión de la línea base incluirán técnicas SIG y de detección remota y cualquier observación en tierra en términos de entrevistas y colaboraciones con las comunidades y el gobierno local o las autoridades municipales. Sin embargo, el proyecto únicamente confiará en los conjuntos de datos de detección remota para la ubicación y extensión de toda deforestación y degradación dentro de las áreas de referencia que cubren las áreas del proyecto y las áreas de fugas. Otros conjuntos de datos usados para sustentar aspectos de la línea base serán tomados de fuentes gubernamentales oficiales, publicaciones con revisión por pares, u otras fuentes de buena reputación.

2.3.1 Actualización de los Factores de Emisiones para Bosques Primarios

Los factores de emisiones para bosques primarios se realizarán para cada evento de verificación y monitoreo. Se han propuesto dos métodos, usando datos LiDAR o un modelo conservador según lo presentado en 2.2 para actualizar los inventarios de carbono en superficie y, así, los factores de emisiones. En los años en que se han adquirido datos LiDAR (es decir, primera verificación y actualizaciones de la línea base), los factores de emisiones se actualizarán usando inventarios de carbono revisados a partir de estas mediciones. En el caso de una verificación sin medidas LiDAR, los inventarios de carbono se actualizarán usando un modelo conservador presentado en la sección 2.2. El uso de estos factores de emisiones de los inventarios de carbono como resultado de transiciones de bosque primario se actualizará.

Según la metodología VM0006 los factores de emisiones también deben actualizarse durante actualizaciones de la línea base. Los vuelos LiDAR se utilizarán durante actualizaciones a la línea base para recalcular los inventarios de carbono y, en consecuencia, los factores de emisiones para bosques primarios.

2.3.2 Actualización de Factores de Emisiones para Bosques Degradados

El proyecto analizará los datos LiDAR sobre el bosque degradado en todas las áreas del proyecto para revisar los factores de emisiones de línea base determinados durante la validación. El nuevo estimado de los factores de emisiones se revisará durante la primera verificación y se actualizará cada 10 años según los requerimientos mínimos del VCS para estas actualizaciones. Para cualquier verificación que pudiere ocurrir entre las actualizaciones de línea base, el proyecto utilizará los factores de emisiones de línea base actualizados y las transiciones entre bosques degradados y tipos de clase no forestal para la contabilidad de carbono. Cualquier degradación adicional de los bosques degradados con una cubierta forestal de 30-70% no se tomará en cuenta entre las actualizaciones de la línea base. Los factores de emisiones de la línea base actualizada representan los inventarios de carbono promedios de aquellos bosques que caen bajo una cubierta de 30-70% según la cubierta forestal derivada de LiDAR y cualquier otro

cambio en términos de una degradación futura o regeneración permanecerá en el mismo rango a no ser que haga transición a tipos de clase forestal o no forestal.

2.3.3 Tabla de Factores de Emisiones para Áreas del Proyecto

Los factores de emisiones determinados en el momento de la validación se presentan en la siguiente tabla para cada proyecto BioREDD+ en la Costa Pacífica Colombiana.

Project Areas	LC	AGT	AGT-SE	BG	BG-SE	AGNT	AGNT-SE	LDW	LDW-SE	SDW	SDW-SE	DTS	DTS-SE	SOC	SOC-SE
BMBC	1	154.3	2.714	43.34	2.159	3.235	0.3436	12.79	0.5433	3.660	0.2861	2.056	0.4501	76.86	5.384
	2	53.98	3.708	16.88	2.757	2.670	0.4172	17.80	1.112	6.256	0.7260	2.904	0.9425	72.87	3.901
	3	15.78	4.469	8.745	3.426	1.673	0.5028	11.16	1.341	1.334	0.7870	1.798	1.122	59.55	5.189
	4	20.51	2.477	10.16	1.919	1.665	0.2786	11.10	0.7430	1.016	0.4006	1.778	0.6166	64.64	5.412
	5	15.96	4.327	5.709	3.365	1.979	0.4868	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	47.29	4.368
	6	6.560	0.9062	2.587	0.7711	0.7968	0.1019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	54.30	4.089
	7	17.96	1.311	6.341	1.160	0.5389	0.1475	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17.82	1.557
CDD	1	175.1	3.247	48.52	3.199	2.841	0.7648	17.35	1.209	3.303	0.6352	1.809	1.001	39.23	5.384
	2	36.98	2.414	12.06	3.939	1.109	0.5716	7.396	1.524	2.142	0.8865	1.190	1.273	38.88	3.901
	3	16.97	2.640	6.029	2.166	0.9592	0.2970	6.394	0.7921	1.417	0.3479	1.012	0.6444	40.11	5.189
	4	8.501	4.459	3.258	3.404	1.455	0.5016	9.700	1.338	1.768	0.8229	1.559	1.124	42.64	5.412
	5	10.82	1.891	4.040	1.595	0.3247	0.2128	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	42.32	4.368
	6	0.2940	0.09000	1.631	0.4634	0.008820	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	39.16	4.089
	7	34.03	3.481	11.20	2.782	1.021	0.3916	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	43.44	1.557
SUPP	1	164.8	3.489	45.97	3.065	3.163	0.4947	16.64	0.7824	3.619	0.3889	2.011	0.6446	44.96	5.384
	2	68.05	4.697	20.90	3.596	2.028	0.5284	14.44	1.409	4.376	0.8251	2.192	1.179	57.47	3.901
	3	10.41	3.875	3.901	3.093	0.7623	0.4360	5.082	1.163	1.259	0.5959	0.8095	0.9587	59.01	5.189
	4	5.847	3.672	2.335	2.891	1.525	0.4131	10.17	1.102	1.830	0.5705	1.632	0.9101	49.48	5.412
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	6	8.313	0.6642	3.194	0.6284	0.2494	0.07473	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	52.96	4.089
	7	26.70	4.387	9.022	3.396	1.401	0.4936	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	37.14	1.557
BMF_ACAPA	1	168.6	1.664	46.90	3.126	1.954	0.6526	16.02	1.032	1.946	0.4861	1.232	0.8452	72.29	5.384
	2	78.30	4.303	23.62	2.620	1.224	0.3681	18.35	0.9815	2.057	0.4751	1.301	0.8055	77.24	3.901
	3	12.94	3.099	4.734	2.543	0.8381	0.3487	5.587	0.9298	1.266	0.4097	0.8856	0.7568	81.96	5.189
	4	17.65	2.656	6.242	2.145	1.129	0.2989	7.530	0.7969	1.760	0.3691	1.195	0.6516	78.14	5.412
	5	15.30	2.139	5.496	1.799	0.4589	0.2407	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	47.29	4.368
	6	7.283	0.5390	2.839	0.4973	0.2185	0.06063	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	72.10	4.089
	7	22.66	1.955	7.798	1.683	0.6799	0.2200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	85.86	1.557
CAJAMBRE	1	158.8	2.754	44.48	2.965	3.302	0.4004	13.06	0.6332	3.804	0.3211	2.101	0.5226	60.55	5.384
	2	69.33	4.604	21.09	3.467	2.830	0.5179	18.87	1.381	6.974	0.8613	3.091	1.164	57.67	3.901
	3	17.18	3.571	9.166	2.855	1.115	0.4017	7.435	1.071	1.871	0.5398	1.185	0.8818	65.46	5.189
	4	28.53	2.920	12.51	2.226	1.756	0.3285	11.71	0.8760	3.307	0.5083	1.880	0.7325	61.62	5.412
	5	24.09	3.525	8.233	2.668	2.223	0.3966	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	47.29	4.368
	6	5.750	0.7001	2.301	0.5567	0.1725	0.07000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	44.40	4.089
	7	5.800	0.1168	2.318	0.1147	0.1740	0.01314	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17.81	1.557
CONCOSTA	1	153.4	2.170	43.12	2.695	3.183	0.4835	16.82	0.7645	3.646	0.3831	2.024	0.6304	54.53	5.384
	2	81.77	4.339	24.43	3.308	2.165	0.4881	24.34	1.302	4.717	0.7713	2.341	1.090	61.74	3.901
	3	15.76	3.184	8.740	2.618	0.7729	0.3582	5.153	0.9552	1.169	0.4173	0.8167	0.7771	76.72	5.189
	4	22.16	3.144	10.65	2.497	1.415	0.3537	9.431	0.9432	2.475	0.4690	1.507	0.7762	52.12	5.412
	5	23.51	2.835	8.056	2.369	0.7053	0.3190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	61.48	4.368
	6	3.273	0.3158	1.393	0.3432	0.09817	0.03553	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	63.11	4.089
	7	16.48	1.713	5.873	1.483	0.4945	0.1927	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	67.55	1.557
MUTATA	1	176.0	3.863	48.72	3.247	3.578	0.5062	14.15	0.8005	4.347	0.4431	2.285	0.6664	61.34	5.384
	2	71.79	5.589	21.76	4.154	3.054	0.6287	20.36	1.677	7.965	1.129	3.352	1.425	99.52	3.901
	3	16.35	4.520	8.917	3.403	1.690	0.5085	11.27	1.356	3.368	0.8615	1.817	1.145	60.97	5.189
	4	29.79	4.652	12.87	3.494	2.244	0.5234	14.96	1.396	5.004	0.8992	2.431	1.180	73.18	5.412
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	6	14.38	4.447	8.321	3.668	1.031	0.5003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.04	4.089
	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RIO_PEPE_ACABA	1	168.3	3.722	46.82	2.926	2.874	0.4596	11.36	0.7268	3.118	0.3656	1.821	0.5997	20.72	5.384
	2	52.51	3.901	16.47	2.903	2.625	0.4389	17.50	1.170	6.131	0.7611	2.855	0.9912	18.33	3.901
	3	15.88	3.786	8.777	2.905	1.527	0.4259	10.18	1.136	2.830	0.6547	1.633	0.9488	19.30	5.189
	4	27.70	3.110	12.27	2.369	1.731	0.3498	11.54	0.9329	3.263	0.5451	1.853	0.7806	19.39	5.412
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	6	16.96	0.9141	12.05	0.7433	1.109	0.1028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16.02	4.089
	7	32.55	3.560	10.76	2.700	1.577	0.4005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	15.72	1.557

3 Métodos de Monitoreo

La implementación del proyecto se monitorea, incluyendo los límites del proyecto, el área donde se evitaron cambios de uso de la tierra y cualquier otra actividad que reduzca los inventarios de carbono o resulte en emisiones en el área del proyecto durante el período de acreditación. Todos los límites de proyecto en el programa BioREDD son unidades funcionalmente descritas con regiones de referencia bien definidas y zonas de colchón para fugas, y no requieren regiones adicionales para monitorear las emisiones.

La estratificación del área del proyecto o en este caso los tipos de clase LULC según VM0006 se monitorea periódicamente porque dos LULC diferentes pueden volverse lo suficientemente similares en términos de carbono para justificar su fusión. La clasificación *ex-post* considera el monitoreo de los estratos del proyecto para verificar la aplicabilidad del LULC *ex ante* y las variables que influencian cada clase. Los procesos de clasificación *ex post* facilitan un monitoreo costo-efectivo, consistente y preciso de los cambios en los inventarios de carbono del proyecto durante el período de acreditación.

El proceso de monitoreo general incluye:

1. Monitoreo de clases LULC antes de la primera verificación buscando cualquier ajuste potencial de las áreas de referencia o de fugas.
2. Monitoreo frecuente de LULC antes de cualquier ciclo de verificación durante el período de acreditación y/o cada 10 años después de la primera verificación según la metodología VM0006 para estimar las transiciones de bosques y bosques degradados a clases no forestales (emisiones) y la transición potencial de clases degradadas y no forestales a clases forestales (retiros). La frecuencia de monitoreo del LULC dependerá de los ciclos de verificación. Si son inferiores a 10 años, los LULC se monitorearán antes de cada verificación. Sin embargo, los factores de emisiones solo se actualizarán cada 10 años.
3. El monitoreo de LULC con datos LiDAR aéreos antes de la primera verificación y cada 10 años de ahí en adelante según la metodología VM0006 para cuantificar la degradación a escala pequeña (talas ilegales o cualquier otra extracción selectiva de árboles) del bosque intacto, la degradación continuada en bosques degradados o cualquier regeneración que cause un cambio de clase LULC.
4. La metodología de LULC sigue el mismo método adoptado para desarrollar mapas LULC de línea base según la metodología VM0006 incluyendo la clasificación de series de tiempo Landsat e imágenes potenciales de radar para capturar las transiciones de LULC dentro de las áreas de proyecto, referencia y fugas.

3.1 MONITOREO DE CAMBIOS EN EL USO DE LA TIERRA

La estratificación o LULC del área del proyecto se monitorea periódicamente porque dos LULC diferentes pueden volverse lo suficientemente similares en términos de carbono para justificar su fusión. La clasificación *ex-post* considera el monitoreo de los estratos del proyecto para verificar la aplicabilidad del LULC *ex ante* y las variables que influencian cada clase. Los procesos de clasificación *ex post* facilitan un monitoreo costo-efectivo, consistente y preciso de los cambios en los inventarios de carbono del proyecto durante el período de acreditación. En las regiones de BioREDD, desarrollamos los LULC según la metodología VM0006 y calculamos los inventarios de carbono y los factores de emisiones. El método LiDAR de línea base se basó en un muestreo aleatorio de un gran área de la región que permitió evaluar el carbono con base en la estratificación y las clases LULC. Además, desarrollamos un mapa de inicio a fin de los inventarios y las reservas de carbono en la región de BioREDD, cubriendo las áreas del proyecto, de referencia y de fugas, permitiendo el desarrollo de procedimientos de monitoreo a diferentes niveles y de cambios potenciales a los LULC y factores de emisiones *ex post* si el costo y la eficiencia se convierten en componentes importantes del monitoreo a futuro.

Incluimos un mínimo de seis clases IPCC LULC (Tierra Forestal, Tierra de Cultivo, Pastizales, Humedales, Asentamientos y Otras Tierras) en las definiciones de clases LULC y el análisis histórico de deforestación y degradación requeridos por la metodología VM0006. Las definiciones de estas clases son consistentes con el Capítulo 2 de IPCC GPG-LULUCF 2003 y se resumen en GeoEcoMap Tarea 7. No hallamos necesaria la definición de más clases LULC específicas para la región de las recomendadas por el IPCC. Sin embargo, agregamos una clase de bosque degradado como clase clave para la región y el proyecto BioREDD.

3.1.13.1.1 Fuentes de Datos

1. El conjunto de datos Landsat 8 a una resolución de 30 m y con imágenes pancromáticas para todo el área del proyecto de BioREDD para el período anterior a cualquier evento de verificación durante el período de acreditación. Aunque las imágenes Landsat solo provee información acerca de la parte superior de la cubierta, su resolución relativamente alta permite discriminar fácilmente entre clases forestales y no forestales, además de la discriminación de bosques degradados, especialmente inmediatamente después de la degradación. Deben adquirirse imágenes en múltiples fechas para tener datos relativamente libres de nubes sobre el área del proyecto de manera anual.
2. Datos de radar del satélite ALOS-2 PALSAR, de banda L con polarización doble (HH y HV) que empezó a adquirir datos en el 2014. Los datos de radar de longitud de onda larga y polarización cruzada proveen información acerca de la estructura vegetal y permiten diferenciar entre tierra intacta, degradada y deforestada. Los datos de radar tienen la ventaja adicional de que no son afectados por la nubosidad y pueden ayudar a mejorar la clasificación de los datos Landsat en áreas contaminadas por nubes y bruma. Se recomienda adquirir datos ALOS-2 PALSAR sobre las regiones del proyecto de BioREDD antes de cualquier evento de verificación durante el período de acreditación. Se recomienda tener más de una imagen para cada región para tener en cuenta cualquier cambio debido a factores ambientales como la humedad del suelo. El proyecto podrá desarrollar un plan con la Agencia Espacial Japonesa para adquirir datos a un costo reducido.
3. Otros conjuntos de datos potenciales pueden incluirse en el análisis, como Terra XSAR a una resolución de 6 m para detectar cambios a pequeña escala en la cubierta forestal, e imágenes ópticas comerciales de alta resolución a resoluciones de 1-5 m para detectar degradaciones. Cualquier satélite futuro con potencial de monitoreo pues los anteriores datos moderados o de alta resolución pueden utilizarse para seguir monitoreando LULC durante el período de acreditación.
4. El método de muestreo aéreo LiDAR diseñado para revisar los factores de emisiones de línea base. Las imágenes LiDAR sobre la muestra de referencia y las nuevas muestras aleatorias permitirán detectar cambios de la cubierta forestal en el sitio permanente y cualquier cambio en las áreas del proyecto o de referencia que podrían deberse a degradaciones a pequeña escala que no serían captadas por imágenes Landsat o de radar. Los nuevos levantamientos LiDAR se ubicarán aleatoriamente en las áreas del proyecto o de referencia entre las clases forestales para evitar cualquier conocimiento a priori de los sitios de monitoreo y reducir la posibilidad de que algún efecto de deforestación y degradación sea evitado intencionalmente.

3.1.2 Procesamiento de Datos

Se aplican técnicas estándar de procesamiento para preparar los conjuntos de datos para la clasificación LULC. Los pasos de procesamiento están separados según el sensor del satélite.

Para los datos Landsat se usan los siguientes pasos de procesamiento:

1. Para reducir el efecto de las nubes, sombras de nubes y bruma sobre las imágenes Landsat, la metodología VM0006 recomienda usar varias imágenes Landsat adquiridas un año antes de cada evento de verificación para permitir una imagen compuesta relativamente libre de nubes.
    a. Todas las imágenes Landsat atravesarán un proceso de corrección atmosférica usando los modelos más recientes en software de procesamiento de imágenes como ENVI/IDL o varios modelos disponibles libremente. Las correcciones atmosféricas producirán productos de reflectancia a partir de las bandas Landsat. Los productos de reflectancia serán ortorectificadas. El análisis de la máscara de nubes incluye segmentar las nubes en las imágenes usando el algoritmo de segmentación ENVI creando umbrales para los valores de reflectancias en las frecuencias RED e IR Cercano. Las sombras de nubes pueden enmascararse usando un método de segmentación similar. Las nubes y las sombras de las nubes pueden separarse usando otros métodos como la clasificación de mayor probabilidad.
    b. Uno de los problemas claves de las imágenes Landsat es el impacto de la bruma sobre los datos. En general, la bruma puede impactar la clase forestal más que cualquier otra clase, haciendo que se confunda con clases no forestales. A menudo la bruma permitirá la clasificación mediante la interpretación visual pero introduce gran incertidumbre en la clasificación LULC automatizada. Al usar

datos de imágenes de varias fechas, los efectos de nubes y bruma pueden retirarse reemplazando automáticamente los pixeles con bruma con otras reflectancias libres de bruma.

c. Las imágenes ópticas pueden ser ortorectificadas para remover distorsiones en el terreno haciendo uso del modelo de elevación digital de la superficie y las rutinas estándar de ortorectificación en el software ENVI. Sin embargo, Landsat 8, y todas las imágenes de la serie Landsat vienen corregidas respecto a distorsiones del terreno y ya se han ortorectificado.

d. El procesamiento de datos LiDAR seguirá los protocolos esbozados en las evaluaciones de línea base en los reportes GeoEcoMap 8 y 9. Se procesarán todas las imágenes LiDAR para crear un modelo de altura de cubierta con celdas de cuadrícula de 1 m y agregadas a 50 m o 100 m para crear métricas de altura forestal incluyendo la altura media de la cubierta superior y el porcentaje de la cubierta que puede compararse con las métricas de altura y los datos de cubierta forestal de levantamientos anteriores para detectar cambios.

2. Antes de la clasificación, las imágenes pueden combinarse para crear mosaicos a partir de un solo conjunto de imágenes con la menor nubosidad posible.

Para los datos ALOS PALSAR usaremos los siguientes pasos de procesamiento:

1. Las imágenes ALOS PALSAR pedidas para la región de BIOREDD deberán incluir el procesamiento básico incluyendo corrección de terrenos, y ortorectificación. Estas opciones existen al pedir los datos. Los datos ALOS PALSAR más comunes estarán en el modo FBD que incluye dos polarizaciones. Sin embargo, si se piden los datos brutos, la corrección de terrenos y ortorectificación puede realizarse usando paquetes en-línea y sin costo dispuestos por JAXA (Agencia Espacial Japonesa) o NASA como el MapReady Remote Sensing Tool Kit: https://www.asf.alaska.edu/data-tools/mapready/
2. Puede realizarse la georeferenciación usando datos externos de alta resolución u otras imágenes usadas para el análisis como imágenes Landsat, que permitirán una estimación precisa del área de deforestación y degradación y cualquier cambio desde las líneas base. La georeferenciación puede mejorarse adquiriendo puntos de unión entre las imágenes ALOS PALSAR y Landsat u otras imágenes de alta resolución para reducir los errores de georeferenciación a menos de un pixel. El número de puntos de unión pueden ser aproximadamente 10-20 esparcidos en toda la escena y seguir los protocolos estándar de detección remota.
3. Una sola imagen ALOS PALSAR únicamente puede cubrir áreas de aproximadamente 100 km x 100 km. Para cubrir todo el área del proyecto se pueden adquirir, procesar y crear mosaicos con múltiples imágenes PALSAR para producir una imagen de extremo a extremo de las áreas de proyecto, fugas y referencia. El mosaico de imágenes se proyectará usando proyecciones estándar de imágenes SIG.
4. El proceso de clasificación ALOS PALSAR para los tipos LULC puede realizarse usando métodos estándar, como la clasificación de mayor probabilidad, provistos en cualquier software o kit de herramientas de SIG y detección remota como ENVI.
5. La aplicación de datos ALOS PALSAR a cualquier método automatizado de detección de cambios puede requerir desarrollar y usar métricas de polarización según el informe GeoEcoMap #13. Para desarrollar esta métrica nos enfocamos en los datos SAR de doble polarización suministradas a intensidades de retrodispersión de radar HH (Transmisión Horizontal y Recepción Horizontal) y HV (Transmisión Horizontal y Recepción Vertical). El Índice de Degradación Forestal por Radar (RFDI, en inglés) se define como la relación normalizada de los dos canales de polarización, dada por:

$$RFDI = \frac{HH-HV}{HH+HV}$$

donde las intensidades de retrodispersión se encuentran en unidades lineales (m^2/m^2). El valor de RFDI varía entre 0 y 1, pues incluso en los terrenos más topográficamente complejos HH siempre es mayor que la retrodispersión HV. Para los datos ALOS PALSAR de modo FBD, la geometría y el ángulo de incidencia no varían a lo largo de los pixeles SAR, permitiendo un análisis temporal del RFDI sin preocuparnos por cambios en la geometría o el ángulo de incidencia o cualquier otra característica de la imagen.

3.1.3 Clasificación LULC

Los mosaicos primero se clasifican en 5 clases: bosque intacto de alta biomasa, bosque secundario/degradado/de menor biomasa, no-forestal (pastizales, tierras de cultivo), nubes, y sombras de nubes. Estas clases se eligieron con base en un análisis visual detallado de las imágenes y comparaciones con el Mapa Corine del Ecosistema (IDEAM) e imágenes de Google Earth, para decidir qué clases eran fácil y consistentemente distinguibles usando Landsat. Debe notarse en particular que la clase "Bosque Degradado/Secundario" en Landsat difiere de la clase "Bosque Degradado" antes descrito para PALSAR – como Landsat no puede penetrar la cubierta se pueden distinguir menos clases, y es probable que esta clase en Landsat incluye bosques no intervenidos pero de menor biomasa, como vegetación inundada o bosques enanos. Las clases de bosque intacto y no-forestales vistos por Landsat y PALSAR deben ser fácilmente comparables.

Las clasificaciones se realizaron usando un clasificador de Máquina de Soporte de Vectores, usando al menos quince regiones de entrenamiento elegidas a ojo para cada clase. Todas las clasificaciones tenían precisiones de usuario superiores al 97% cuando fueron comparadas contra los datos de entrada, muy superior al 90% normalmente utilizado para probar la aceptabilidad de una clasificación que se usará para un análisis de cambio en el uso de la tierra (GOFC-GOLD, 2012).

Si un mosaico tiene nubosidad sobre un 30% de su área, las comparaciones normales en términos del área total, como se realizaron para PALSAR, no resultan apropiadas aquí. En vez de esto, solo pueden compararse las áreas libres de nubes en pares de mosaicos. Se crea una máscara para cualquier pixel que sea nube o esté bajo la sombra de una nube en cualquier imagen, para retirar los efectos de la bruma se le aplica un buffer de 2 pixeles a esta máscara, y la máscara se usa entonces sobre ambas imágenes. Estos proveen dos conjuntos de imágenes comparativas que pueden usarse para calcular la tasa de deforestación y degradación entre la imagen de *benchmark* y las imágenes usadas para verificación.

A pesar de las limitaciones de la nubosidad, los datos Landsat pueden ofrecer una perspectiva a largo plazo de la tasa deforestación. Para realizar el análisis con todas las clases VM0006 recomendadas, las clases no forestales o deforestadas se dividen además en clases antropogénicas y naturales. Estas incluyen pastizales y cultivos para las clases antropogénicas y los humedales y demás tierras como clases naturales. Para desarrollar la clasificación usamos una máscara para tapar las clases no forestales dentro de los mosaicos de imágenes y desarrollamos nuevas áreas de entrenamiento usando el mapa del ecosistema Corine del IDEAM, un análisis contextual de imágenes para cultivos, y un análisis de las señales de radar y Landsat. El mapa final debe incluir 8 clases incluyendo los cuerpos de agua. Las ventajas de esta clasificación en dos etapas son: 1) una separación precisa de las clases intactas, degradadas y no forestales en el primer paso dada la calidad de las imágenes y el ruido restante por la bruma y las sombras. Estas clases primarias son importantes para el análisis de transiciones LULC, y 2) para enfocar las clases de vegetación no forestal y usar las características de la señal de manera más eficiente para separar los tipos de clase.

Se desarrollan los mapas finales para el análisis de deforestación y degradación con 8 clases (bosque intacto, bosque degradado, pastizales, cultivos, humedales, asentamientos, otras tierras, agua). Las imágenes ALOS PALSAR se combinan entonces con la clasificación del mapa LULC para mejorar la clasificación final y, a la vez, mejorar la transición de clases entre los períodos. Para cada par de imágenes subsiguientes en el período de monitoreo, calculamos el área de cada transición de tierra y reportamos los resultados en una matriz de LULC y transición forestal. Nótese que para la deforestación, las tierras deben haber estado sin cubierta forestal por un período más largo que aquel definido como "sin inventario temporalmente". Al igual, para la degradación, las tierras deben haber pertenecido al estrato de menor densidad de inventarios de carbono durante al menos 3 años. Se aplica un filtro temporal apropiado para garantizar que solo aquellas tierras que cumplan la condición de tres años sean designadas como degradadas. El filtro es básicamente una interpretación visual de pixeles en las imágenes Landsat posteriores para confirmar cualquier área de deforestación y degradación. Después de calcular el área de las transiciones entre clases LULC entre el período de *benchmark* y el de monitoreo, se debe combinar cualquier transición entre bosque (intacto o degradado) a no-bosque (pastizales, cultivos, asientos, otras tierras, humedales) y clasificarla como un área deforestada. Todos los pixeles de bosques intactos que cambien a la clase forestal degradada se consideran parte de la clase degradada. Las transiciones a bosques secundarios se incluyen contabilizando todos los pixeles que hacen transición de la clase no forestal a la clase forestal degradada en la siguiente imagen periódica.

3.1.4 Análisis de Cambios LULC

3.1.4.1 Cálculo de Precisión e Incertidumbre

Monitoreo de Deforestación, Perturbaciones Naturales y Fugas

Para garantizar consistencia y resultados de calidad, los analistas espaciales que realizan el procesamiento de imágenes, la interpretación y los procesos de detección de cambios se ceñirán estrictamente a las mejores prácticas y a las pautas de buenas prácticas al usar métodos alternativos para cuantificar la deforestación. Todas las fuentes de datos y los procesos analíticos se documentarán y archivarán (detalles en la sección 3.1.4.2).

La precisión de la clasificación se evaluará comparando la clasificación con los puntos de verdad en tierra o muestras de imágenes de alta resolución. Los datos adquiridos de puntos de verdad en tierra se registrarán (incluyendo coordenadas GPS, clase identificada de uso de tierra, y evidencias fotográficas de soporte) y se archivarán. Cualquier punto de muestra de las imágenes de alta resolución usada para evaluar la precisión de la clasificación también se archivará. Las muestras usadas para evaluar la precisión de la clasificación deben estar bien distribuidas a lo largo y ancho del área del proyecto (hasta donde sea posible considerando la disponibilidad de las imágenes de alta resolución y/o la logística para adquirir datos de verdad en tierra), con una intensidad de muestreo mínima de 50 puntos cada una para las clases forestales y no forestales.

La clasificación solo se usará en el paso de detección de cambios en la cubierta forestal si la precisión general de la clasificación, calculada como el número total de muestras correctas / el número total de muestras, es igual o superior a 90%.

Todas las fuentes de datos y los procedimientos de procesamiento, clasificación y detección de cambio se documentarán y almacenarán en un archivo electrónico dedicado a largo plazo.

La información relacionada con el monitoreo de la deforestación registrada el archivo incluirá:

1. Mapas forestales / no forestales y mapas de cambios en LULC;
2. Documentación del tipo de software y los procedimientos aplicados (incluyendo todos los pasos de pre-procesamiento y correcciones, las bandas espectrales usadas en las clasificaciones finales, y las metodologías y los algoritmos de clasificación aplicados), si procediere; y
3. Datos usados para la evaluación de precisión – los puntos de verdad en tierra (incluyendo coordenadas GPS, clase identificado de uso de tierra y evidencias fotográficas de apoyo) y/o los puntos de muestra de las imágenes de alta resolución.

Los procedimientos de control de calidad relacionados con el monitoreo de fugas incluye una revisión de la literatura vigente al menos cada 5 años para encontrar información sobre los parámetros de monitoreo MANFOR, PROTFOR, y TOTFOR. Además, se implementarán evaluaciones rurales participativas para evaluar el tiempo que la gente ha estado viviendo en el área del proyecto y el cinturón de fugas por personal con experiencia en levantamientos comunitarios en áreas rurales en Brasil.

El personal involucrado en revisar la línea base tendrá un conocimiento detallado con respecto al modelamiento espacial y a cambios en el uso de la tierra y estará profundamente familiarizado con las metodologías REDD. Los datos de detección remota incluirán conjuntos de datos oficialmente publicados, o imágenes clasificadas, que cumplan los requisitos de evaluación de precisión dispuestos en la metodología VM0006.

3.1.4.2 Archivo de Datos

Los datos archivados se mantendrán al menos dos años después del final del período de acreditación del proyecto. Dado el tiempo extendido y la velocidad de producción de versiones actualizadas de software y nuevo hardware para el almacenamiento de datos, los archivos electrónicos se actualizarán periódicamente a un formato al que puedan acceder futuras aplicaciones de software, según proceda.

4 Organización

4.1 ROLES & RESPONSABILIDADES

Rol	Responsabilidades	Competencias
Coordinador del Proyecto	Supervisión del proyecto Dirección de expertos forestales, comunitarios y de monitoreo Supervisión del entrenamiento del equipo de monitoreo Revisión de cumplimiento de los procedimientos de AC/CC Reportar resultados de monitoreo a los proponentes del proyecto y ayudar a preparar reportes de monitoreo e implementación	Al menos una licenciatura o su equivalente Experiencia con la gestión de equipos Experiencia trabajando en la misma región o país que el proyecto Tiene un idioma en común con todos los gerentes subordinados
Experto en Monitoreo de Carbono por LiDAR	Analista directo de LiDAR con experiencia en el cálculo estadístico de carbono Entrenar equipos de LiDAR y de monitoreo de carbono de ser necesario Consolidar datos de estimados de carbono y actualizar los factores de emisiones de carbono de línea base, elaborar datos de mediciones, estimados, y reportes	Al menos una maestría con habilidades extensas en detección remota por LiDAR y biometría forestal con experiencia extensa en el análisis estadístico de los estimados de carbono y el análisis de incertidumbre. Experiencia manejando equipos y dirigiendo el inventario LiDAR aéreo.
Experto en Detección Remota de LULC	Analistas directos de detección remota y operaciones de vuelos LiDAR Consolidar y preparar reportes de monitoreo de cambios de LULC Realizar análisis técnicos de detección remota	Al menos una licenciatura en detección remota (preferiblemente maestría) con experiencia extensa en la detección remota. Experiencia manejando equipos.

4.2 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

4.2.1 La arquitectura de gestión del sistema MRV

La Sección de MRV: Para gestionar las distintas funciones del sistema MRV se propone una oficina de gestión centralizada. Esta oficina puede estar ubicada o bien en una de las entidades gubernamentales como el IDEAM, una ONG local que trabaje con el proyecto REDD, o cualquier otra institución gubernamental o privada. Su objetivo principal consiste en organizar y manejar a los expertos de MRV a nivel nacional y local, para mantener el sistema MRV y promover la divulgación de datos. La misma Sección MRV que se establecerá para la MRV nacional tendrá responsabilidad de ejecutar MRV a nivel del proyecto y de construir la capacidad de los actores relevantes para que realicen las tareas. En el programa BioREDD, hay varios proyectos dentro de la misma región geográfica. Uno o todos los proyectos pueden tener una sola unidad y estructura administrativa. La Sección MRV se subdivide en cuatro unidades independientes pero estrictamente conectadas:

1. Unidad de Bases de Datos/Sistemas/Metadatos (DBM)
2. Unidad de Satélite/Detección Remota/SIG (RS)
3. Unidad de Inventario Forestal (FIN)
4. Unidad de Reportes (REP).

Cada Unidad tiene sus propios expertos y aplicaciones de software. Un Coordinador de MRV administrará la Sección de MRV.

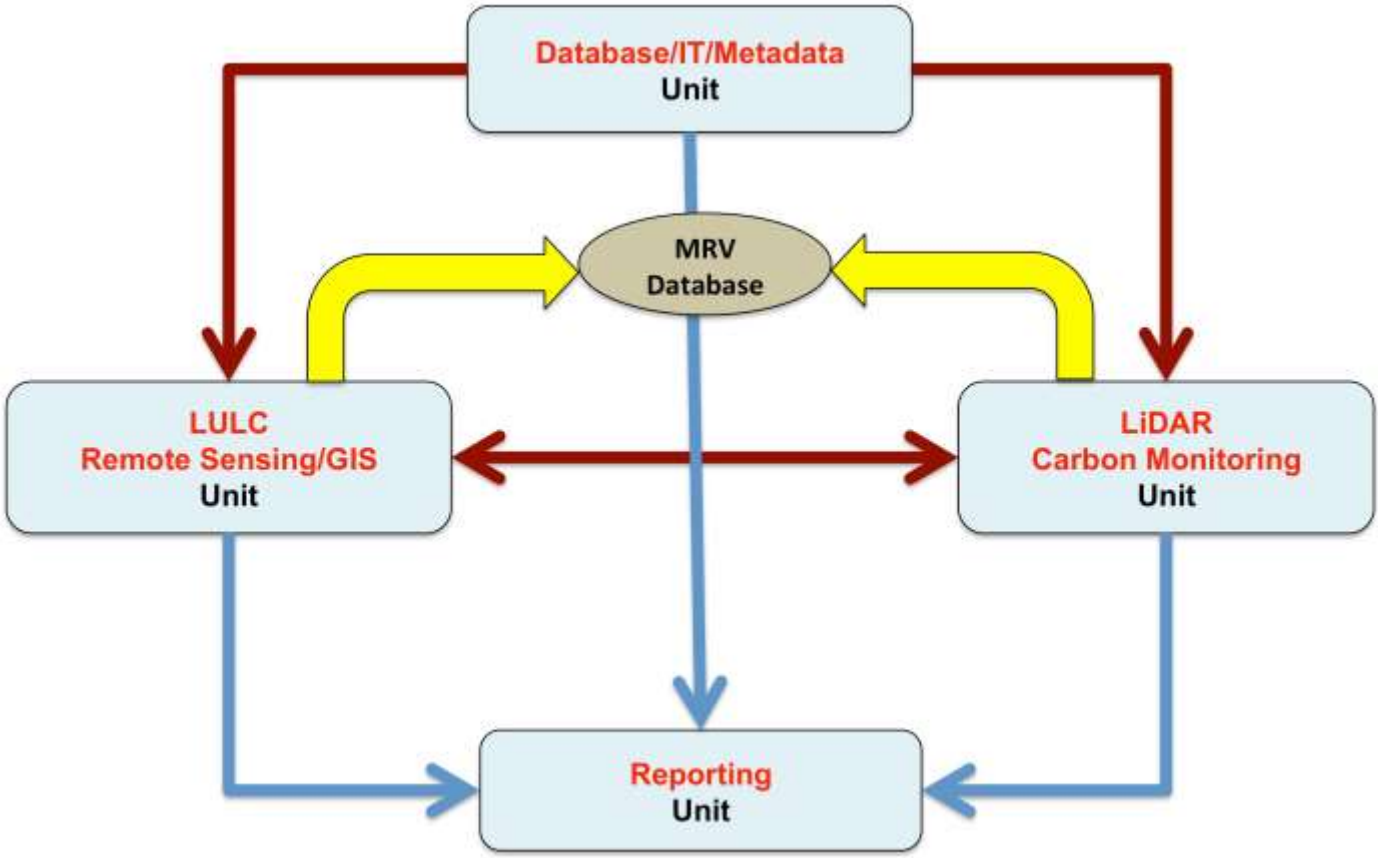

Fig. 4. Diagrama que muestra las unidades MRV y las conexiones entre las unidades de medición, la unidad de reportes y las unidades de bases de datos de MRV.

4.2.1.1 Unidad de LULC Detección Remota/SIG (LRS)

El objetivo principal de la Unidad LULC RS consistirá en el procesamiento y análisis de imágenes para producir las capas de clasificación Uso de Tierra/Cubierta Vegetal y realizar las ediciones y los análisis SIG para garantizar la integridad de los datos en la base de datos de monitoreo y reportes (MRV en general). Se usarán imágenes satelitales multi-temporales, DEM y eventualmente otros datos auxiliares para identificar la detección de cambios en las clases forestales. Cuando se hayan producido y validado las capas LULC, serán cargadas a la base de datos de monitoreo. Debe entregarle gráficas y datos tabulados a la Unidad de Reportes según sus solicitudes periódicas. Esta Unidad, que deberá incluir dos expertos, podrá hacer uso de soporte técnico de las unidades REP y FIN para tareas específicas

4.2.1.2 La Unidad de Monitoreo de Carbono por LiDAR (LCM)

El objetivo principal de la unidad LCM consistirá en recolectar los levantamientos LiDAR aéreos antes de la primera verificación y cada 10 años de ahí en adelante para actualizar los factores de emisiones de carbono de línea base para bosques intactos y degradados. En el proyecto BioREDD, la LCM es responsable de realizar cualquier pos-procesamiento necesario de los datos LiDAR, desarrollar métricas de altura, y usar el modelo de biomasa forestal en superficie por LiDAR desarrollado para los estimados de línea base y calcular nuevos estimados de inventarios de carbono e incertidumbre en bosques intactos y degradados. Además, los datos LiDAR aéreos y las potenciales imágenes espectrales aéreas se usarán para cuantificar los cambios asociados con la degradación a pequeña escala por talas selectivas e ilegales. La unidad debería incluir experiencia para hacer cumplir los requerimientos de las observaciones LiDAR indicados en este informe y tener las habilidades estadísticas para estimar los nuevos inventarios de carbono y la incertidumbre para los tipos de clase forestal y para actualizar todas las reservas de carbono indicados en el informe GeoEcoMap # 12. La Unidad también podrá aprovecharse del apoyo técnico de la unidad RS y demás unidades en tareas específicas. Debe enviarle gráficas y datos tabulados/agregados a la Unidad de Reportes cuando esta

se los solicite. Los recursos humanos necesarios para gestionar esta unidad incluyen un experto en el cálculo de carbono por LiDAR y recursos compartidos potenciales con la unidad RS para el procesamiento y análisis LiDAR.

4.2.1.3 La Unidad de Reportes (REP)

Esta Unidad provee reportes MRV estándar y periódicos (consistentes con los requerimientos para reportes dispuestos en las pautas de UNFCCC y la metodología VCS) para divulgación de datos e información agregada, recolectando la información necesaria de las otras tres unidades. Los reportes son un elemento clave del MRV porque provee los medios mediante los cuales, por un mecanismo REDD+ futuro, se evaluará el desempeño del proyecto en comparación con sus compromisos o escenario de referencia y, por tanto representará la base para asignar incentivos. Se requiere de un experto MRV REDD para manejar esta unidad.

Referencias

Pearson, T. R., Brown, S., & Casarim, F. M. (2014). Carbon emissions from tropical forest degradation caused by logging. Environmental Research Letters, 9(3), 034017.